

SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

José F. C. Monteiro - monteiro@asap.iae.cta.br

João R. Barbosa - barbosa@mec.ita.cta.br

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Departamento de Energia
12.228-901 São José dos Campos, SP

***Resumo:** O presente trabalho apresenta o estudo de métodos numéricos apropriados para um modelo de simulação de motores de combustão interna, e sua aplicação ao estudo de um motor monocilíndrico. O motor é modelado por blocos funcionais que podem ser combinados para compor o motor a ser estudado. Os blocos disponíveis para compor o motor são: câmara de combustão, cárter, duto, carburador, junções, volume, válvula. Para cada um desses componentes foi escolhido um modelo numérico apropriado, tendo-se em vista convergência e oscilações numéricas inerentes aos métodos. As equações de conservação invíscidas, acopladas a modelos de perdas apropriados a cada componente e suas condições de contorno, são resolvidas utilizando-se algoritmos implementados em C++. São apresentadas as simulações de comportamento de algumas configurações de motores e a comparação dos resultados obtidos com dados disponíveis na literatura, dando-se ênfase à sintonização de dutos*

***Palavras-chave:** simulação, desempenho, motor a pistão, motor de combustão interna.*

1. INTRODUÇÃO

A pesquisa de motores atualmente está voltada para a melhoria de desempenho dos motores em uso. Poucas empresas se dedicam a novos projetos. Devido à existência de enormes recursos computacionais hoje em dia, é possível a simulação do escoamento num motor completo, de acordo com Takizawa et al. (1982) e Heywood (1988). Esses programas são muito elaborados e caros, como o FIRE da AVL (1996). Fazem a análise pormenorizada de regiões críticas do motor. Existem, também, outros programas, como os baseados em modelos fluidodinâmicos unidimensionais e modelos termodinâmicos simples, que reduzem drasticamente o tempo de computação requerido e fornecem excelentes resultados globais do motor. Com o avanço no desenvolvimento dos recursos computacionais, ambos os tipos de programas têm aplicação garantida no futuro, prevendo-se que os modelos mais complexos incorporem os modelos unidimensionais e termodinâmicos simples, para definir as condições de contorno e diminuir o tempo de computação, segundo Chen et al. (1992).

Este trabalho se enquadra no segundo tipo de programas citados acima. Componentes do motor tais como o cilindro, o cárter, as junções, os silenciadores, o turboalimentador, têm seu comportamento descrito através de modelos termodinâmicos simples, com correções empíricas. Os sistemas de admissão e exaustão são descritos pelo método de Lax-Wendroff de

dois passos, escolhido dentre os métodos por ser relativamente rápido e não incluir oscilações numéricas exageradas. Pormenores dessa seleção podem ser encontradas em Monteiro (1999).

2. ESCOLHA DO MÉTODO PARA SOLUÇÃO DO ESCOAMENTO NOS DUTOS

Os métodos testados para solução do escoamento no interior dos dutos não apresentaram dificuldades no tratamento de pequenos gradientes, mas tiveram comportamentos muito diferentes no tratamento de grandes gradientes. Para a comparação do desempenho dos métodos foram simulados numericamente os escoamentos causados por condições que levam ao aparecimento de regiões de grandes gradientes no escoamento resultante: a) vazão em massa na entrada do duto como um pulso de forma senoidal; b) vazão em massa constante na entrada, aplicada no instante $t = 0$ e mantida constante durante todo o processo. As seguintes características foram analisadas na comparação dos métodos para a escolha do mais apropriado: a) capacidade e precisão do método no tratamento das regiões de grandes gradientes; b) Tempo de processamento despendido na solução dos problemas.

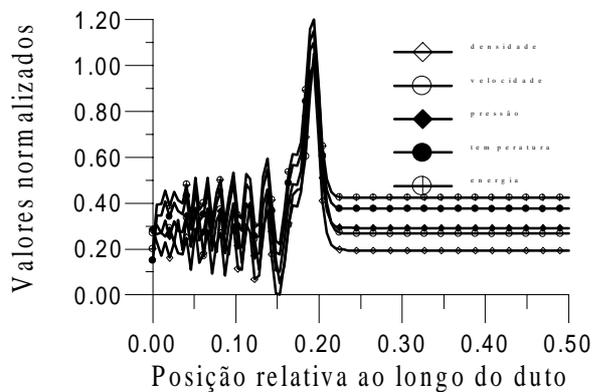


Figura 2-1 - Método FRAM, evolução da onda senoidal

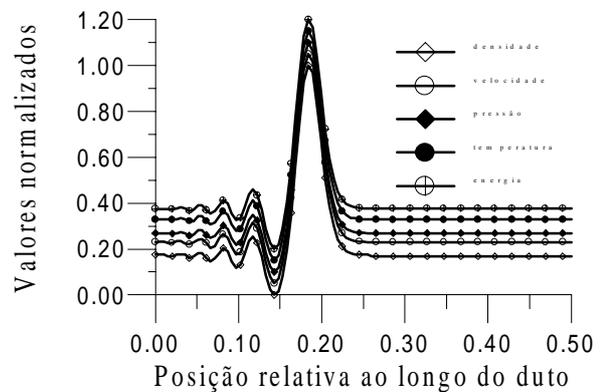


Figura 2-2 - Método MacCormack, evolução da onda senoidal

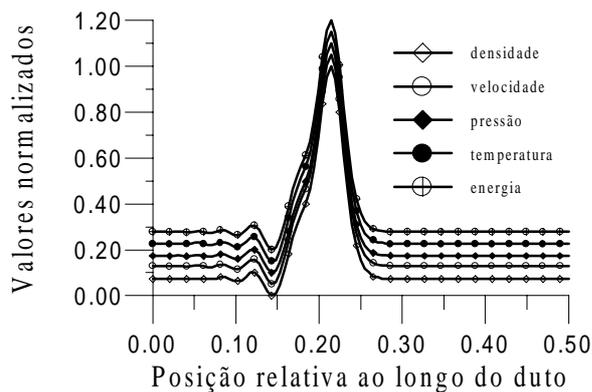


Figura 2-3 - Método Lax-Wendroff de dois passos, evolução da onda senoidal

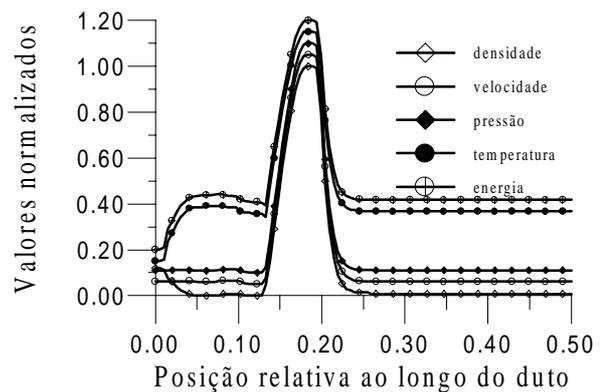


Figura 2-4 - Método Lax-Wendroff de um passo, evolução da onda senoidal

As Figuras 2-1 a 2-8 contém os resultados obtidos para os comportamentos das diversas propriedades nela indicadas, em um instante genérico, durante a evolução da solução. Para melhor visualização, as curvas estão defasadas na direção vertical. Verificou-se que:

a) Não foi possível obter sucesso no tratamento de regiões de grandes gradientes com o método FRAM (Chapman, 1981). Verifica-se pelas Figuras 2-1 e 2-5 que o método

apresentou oscilações excessivas na solução dos problemas apresentados. Por esta razão este método foi descartado.

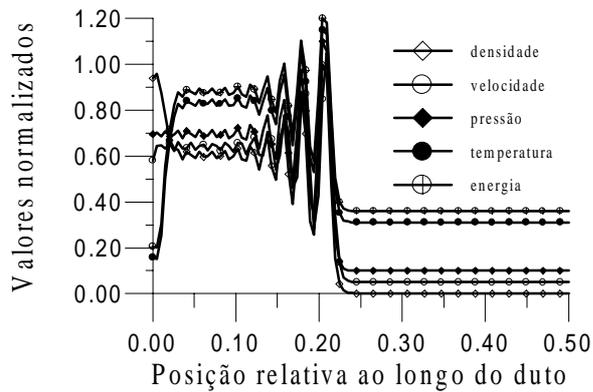


Figura 2-5 - Método FRAM, onda com vazão em massa constante

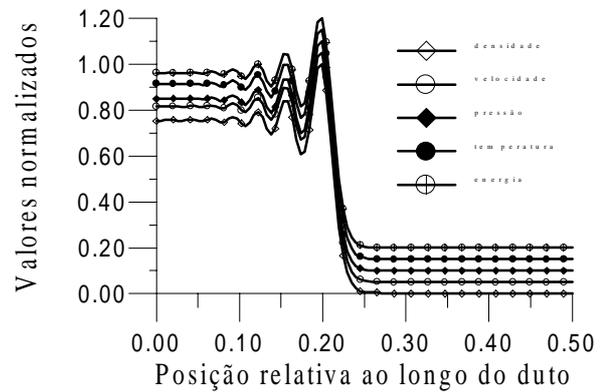


Figura 2-6 - Método MacCormack, onda com vazão em massa constante

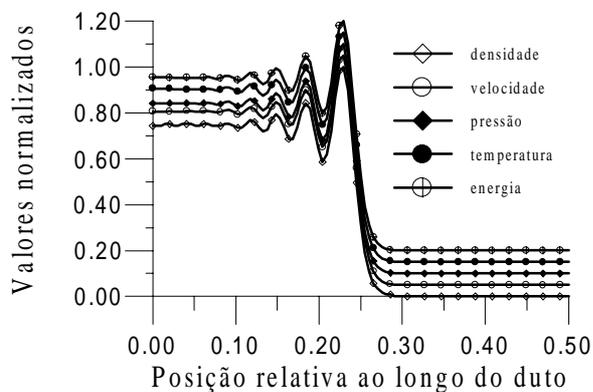


Figura 2-7 - Método Lax-Wendroff de dois passos, onda com vazão em massa constante

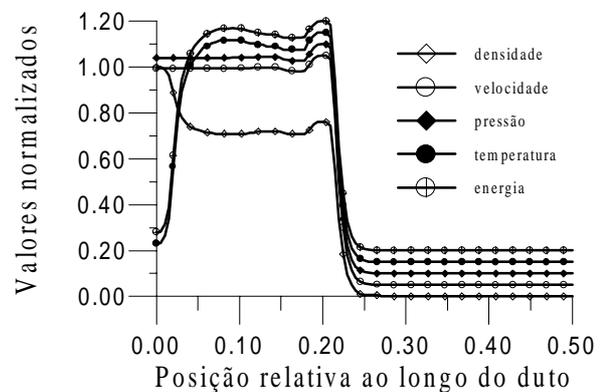


Figura 2-8 - Método Lax-Wendroff de um passo, onda com vazão em massa constante

b) Os métodos de MacCormack (1982), Lax-Wendroff (1960) de um passo e Lax-Wendroff de dois passos [Poloni et al. (1987)], resolveram adequadamente as regiões de grandes gradientes. As precisões dos resultados foram comparáveis. Nenhum destes métodos apresentou resultados de destaque ou que indicasse sua não adequação aos problemas.

c) O método Lax-Wendroff de um passo foi, dentre os três métodos, aquele que apresentou o menor tempo de processamento na solução dos problemas apresentados. Assim, o método de Lax-Wendroff de um passo foi o escolhido para a utilização no programa final, por este ser o método que depende o menor tempo de processamento. Embora este método tenha sido escolhido, sua implementação no programa foi feita de forma que todos os cálculos envolvendo o método ficassem situados em um único módulo, de forma a permitir sua fácil substituição.

3. MODELAÇÃO DOS COMPONENTES E DO MOTOR

Cada elemento do motor, como indicado na Fig. 3-1, é modelado separadamente, obtendo-se um sistema complexo de equações diferenciais e algébricas, solucionado iterativamente. Conforme o desenvolvimento de Monteiro (1999), o componente do motor que realmente apresenta problemas quanto à solução numérica e estabilidade do algoritmo é o

duto. Desta forma, atenção mais detalhada é dada a ele, para o qual foram testados alguns métodos numéricos.

A seguinte nomenclatura foi utilizada no desenvolvimento das equações do escoamento:

símbolo	descrição	unidade	símbolo	descrição	unidade
A	área	m^2	P	pressão	$\frac{N}{m^2}$
c	velocidade do som	$\frac{m}{s}$	P_t	pressão total	$\frac{N}{m^2}$
e	energia interna específica	$\frac{J}{kg}$	T	temperatura	K
f	fator de atrito	-	T_t	temperatura total	K
g	termo referente ao atrito	$\frac{m}{s^2}$	u	velocidade	$\frac{m}{s}$
q	termo referente a transferência de calor	$\frac{m^2}{s^3}$	ρ	densidade	$\frac{kg}{m^3}$
\dot{m}	vazão em massa	kg/s	Φ	concentração relativa de produtos de combustão	-

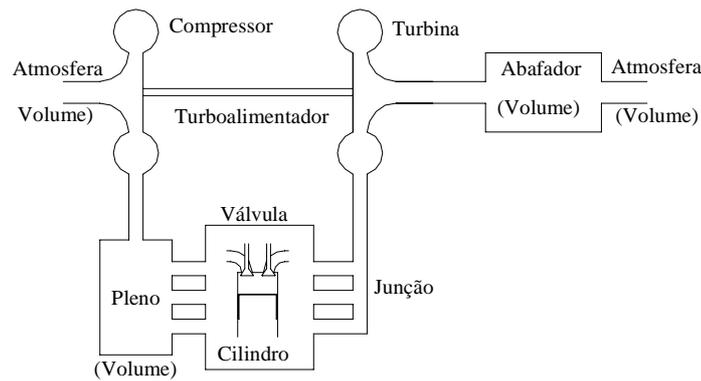


Figura 3-1 - Esquema de um motor monocilíndrico.

O cálculo do escoamento no duto é feito para a parte interna e para a parte de fronteira. A parte da fronteira compreende os elementos de fronteira e adjacente. Considera-se escoamento unidimensional. Na Região Interna as equações, utilizadas na forma matricial, foram:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + C = 0 \quad (1)$$

com

$$W = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho \left(e + \frac{u^2}{2} \right) \\ \rho \Phi \end{bmatrix}; \quad F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + P \\ \rho u \left(e + \frac{u^2}{2} + \frac{P}{\rho} \right) \\ \rho u \Phi \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + P \\ \rho u \left(e + \frac{u^2}{2} + \frac{P}{\rho} \right) \\ \rho u \Phi \end{bmatrix} \frac{1}{A} \frac{dA}{dx} + \begin{bmatrix} 0 \\ \rho g \\ -\rho q \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

De acordo com Poloni et al. (1987), os dois passos no método de Lax-Wendroff são:

$$W_{j+1/2}^{n+1/2} = \frac{1}{2}(W_{j+1}^n + W_j^n) - \frac{\Delta t}{2\Delta x}(F_{j+1}^n - F_j^n) - \frac{\Delta t}{4}(C_{j+1}^n + C_j^n) \quad (3)$$

$$W_j^{n+1} = W_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta x}(F_{j+1/2}^{n+1/2} - F_{j-1/2}^{n+1/2}) - \frac{\Delta t}{2}(C_{j+1/2}^{n+1/2} + C_{j-1/2}^{n+1/2}) \quad (4)$$

O método apresenta oscilações, que são eliminadas com o método de correção de fluxo (FCT - *Flux Corrected Transport*), impondo amortecimento e posteriormente retirando-o. Os detalhes do método podem ser vistos em Monteiro (1999). Um método explícito para a solução das equações de diferenças finitas foi adotado, requerendo o uso de um coeficiente de CFL, segundo Courant et al. (1967), definido por:

$$\text{CFL} = \frac{(c + |u|)\Delta t}{\Delta x} \leq 1, \text{ fixado em } 0,8. \quad (5)$$

A Região da Fronteira foi tratada diferentemente, uma vez que o método para solução do escoamento no interior do duto usa o esquema de diferenças finitas centradas, não adequado para os nós da fronteira. Para essa região foi utilizado o método das características [Benson (1982)], que apresenta uma solução simples, estável, e com boa precisão nos resultados. No desenvolvimento do método das características, é necessária a introdução da velocidade do som para serem obtidas as equações que definem as linhas características de Mach e as linhas características da trajetória que são dadas pelas Eqs. 6a.

$$\frac{dP}{dt} + \rho c \frac{du}{dt} + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 = 0 \quad \frac{dP}{dt} - \rho c \frac{du}{dt} + \Delta_1 + \Delta_2 - \Delta_3 = 0 \quad \frac{dP}{dt} - c^2 \frac{d\rho}{dt} + \Delta_1 = 0 \quad (6a)$$

onde

$$\Delta_1 = -(\gamma - 1)(u\rho g + \rho q) \quad \Delta_2 = \rho u c^2 \frac{1}{A} \frac{dA}{dx} \quad \Delta_3 = c\rho g \quad (6b)$$

Verificou-se que a solução explícita do elemento de fronteira se tornava instável quando os elementos externos, resolvidos por métodos implícitos, apresentavam uma variação acentuada nos valores das propriedades para um passo de tempo. O procedimento adotado para evitar esta instabilidade consiste na aplicação de uma solução semi-implícita, para o passo no tempo, no ponto da fronteira. O ponto adjacente à fronteira é solucionado considerando-se a contribuição explícita do elemento interno ao duto e a contribuição semi-implícita do elemento da fronteira (Monteiro, 1999):

As Junções foram modeladas segundo Bingham e Blair (1985), utilizando-se a quantidade de movimento modificada com coeficientes experimentais de perda de pressão.

Os Volumes dos silenciadores e dos plenos foram tratados como volumes termodinâmicos.

A Câmara de Combustão foi considerada como um sistema termodinâmico aberto, com propriedades e composição uniforme dos gases, levando-se em conta a variação destas grandezas devidas à transferência de calor, à transferência de trabalho, ao fluxo de massa através das suas fronteiras e do seu deslocamento. É dividida em zonas para que os processos de combustão sejam melhor simulados, conforme Langeani (1995).

O Cárter é modelado como a câmara de combustão, apenas com a consideração adicional de escoamento adiabático e sem reações químicas.

O Turboalimentador foi modelado a partir dos mapas característicos do compressor e da turbina, conforme Cohen et al. (1996), utilizando as equações:

$$\text{compressor} \quad r_p = C_a + C_b \dot{m} + C_c \dot{m}^2 - e^{C_d + C_e \dot{m}} \quad \eta = C_a + C_b \dot{m} + C_c \dot{m}^2 - e^{C_d + C_e \dot{m}} \quad (7)$$

$$\text{turbina} \quad \dot{m} = C_a - C_b e^{C_c r_p} \quad \eta = C_a - C_b r_p^2 - e^{C_c - C_d r_p} \quad (8)$$

4. RESULTADOS

Para qualificação dos resultados apresentados pelo programa foram estudados diversos processos:

- Escoamento em dutos com o transporte de uma descontinuidade de temperatura, com a propagação de uma onda de choque, com reflexão de onda em extremidade fechada, com a propagação de uma pequena perturbação, em regime permanente, etc.;
- Ciclo ideal fechado para varias relações ar-combustível,
- Escoamento através de junção e de volume em regime permanente,

Sempre que possível esses resultados foram comparados com valores obtidos por solução analítica. Nos diversos casos estudados o programa forneceu resultados que são compatíveis com resultados e comportamentos expressos na literatura.

É de se desejar que sejam levantados dados experimentais, para que se possa completar a certificação do programa desenvolvido neste trabalho, de forma a permitir a utilização não somente para a análise qualitativa do comportamento de motores como também para a análise quantitativa dos diversos componentes. Esses levantamentos não foram incluídos no presente trabalho e devem ser alvo de estudos posteriores.

4.1 Escoamento Subsônico Isentrópico em Dutos

A Figuras. 4-2 e 4-3 serviram de base para fins de simulação de dutos de seções constante e variável.

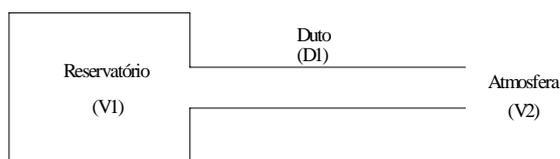


Figura 4-2 - Esquema para simulação do duto de seção constante

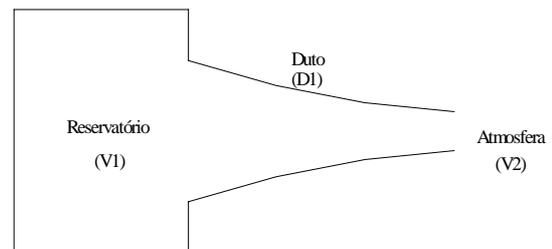


Figura 4-3 - Esquema de simulação, duto de seção variável

Alguns tipos de escoamento em dutos foram selecionados, especialmente aqueles que têm solução analítica, como o escoamento subsônico isentrópico em um duto quando este está submetido a pressões diferenciadas em suas extremidades. Por ser o escoamento isentrópico, o comprimento do duto não influi nos resultados, sendo que, para duto de seção constante, o escoamento se resume à passagem por um orifício cuja área representa a área da seção transversal do duto, regido pelas equações (9), segundo Van Wylen e Sonntag (1976). Para a obtenção do diferencial de pressão, o escoamento é admitido como a descarga de um volume, com propriedades constantes, para a atmosfera.

$$\frac{T_g}{T_{t1}} = \left(\frac{P_2}{P_{t1}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}; \quad \rho_g = \frac{P_g}{RT_g}; \quad T_{t1} = T_g \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_g^2 \right); \quad u_g = M_g \sqrt{\gamma RT_g}; \quad (9)$$

$$\dot{m}_g = \rho_g A_g u_g$$

Os valores obtidos pela solução analítica, para diversos diâmetros de dutos, são comparados com os valores obtidos pelo programa nas Tabelas 4-1 e 4-2.

Tabela 4-1 Resultados para duto de seção constante, razão de pressão 1,3

Pressão no reservatório		131,72 kPa		
Temperatura no reservatório		1000 K		
Mach no duto		0,6356 -		
Duto		Vazão		
Diâmetro	Comprimento	Sol. Analítica	Programa	Diferença
mm	mm	kg/s	kg/s	%
10	500	0,011316	0,011313	0,031
20	500	0,045265	0,045251	0,031
30	500	0,101846	0,101815	0,031
40	500	0,181060	0,180994	0,037

Pelos valores apresentados verifica-se uma boa correlação dos valores calculados pelo programa com os valores obtidos pelo cálculo analítico.

Tabela 4-2 Resultados para duto de seção constante, razão de pressão 1,6

Pressão no reservatório		162,12 kPa		
Temperatura no reservatório		1000 K		
Mach no duto		0,8614 -		
Duto		Vazão		
Diâmetro	Comprimento	Sol. Analítica	Programa	Diferença
mm	mm	kg/s	kg/s	%
10	500	0,015774	0,015757	0,110
20	500	0,063097	0,063028	0,110
30	500	0,141968	0,141812	0,110
40	500	0,252387	0,252111	0,110

Em dutos de seção variável, o comprimento do duto também não exerce influência nos resultados, porém a solução analítica é um pouco mais elaborada.

Inicialmente foram utilizadas as equações (9) para definir o escoamento na extremidade de saída. Com o valor da vazão em massa, que é constante em todas as seções do duto, foram calculados os valores do número de Mach nas diversas seções do duto.

$$\frac{\dot{m}}{A} = \sqrt{\frac{\gamma}{R}} \frac{P_1}{\sqrt{T_1}} \frac{M}{\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}} \quad (10)$$

Com o valor do número de Mach, as equações (9) também fornecem os valores das

demais propriedades da seção.

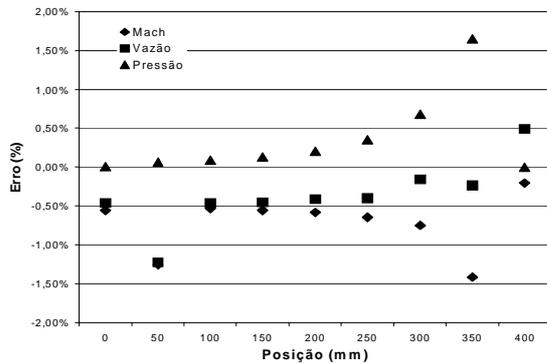


Figura 4-4 - Resultados para duto de seção variável com discretização de 40 seções

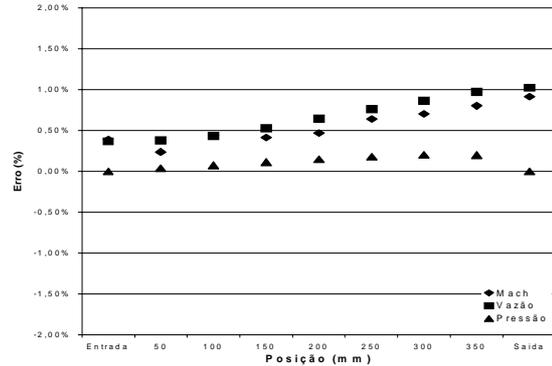


Figura 4-5 - Resultados para duto de seção variável com discretização de 200 seções

As Figuras 4-4 e 4-5 apresentam os valores obtidos pelo programa, comparados com os valores obtidos pela solução analítica. Foram simulados os escoamentos em um duto com variação linear do diâmetro, discretizado com 40 e 200 seções. Pode-se notar que as diferenças mais acentuadas são apresentadas pelos elementos próximos à fronteira e que com o maior número de seções este erro é reduzido, conforme esperado. A discretização de 40 seções apresentou erros mais acentuados em regiões próximas da fronteira porque a malha era pouco refinada. São, entretanto, valores ainda adequados à simulação de motores.

4.2 Motor Monocilíndrico

Uma comparação dos resultados do programa com aqueles apresentados pela literatura, revelou a necessidade da obtenção de dados adicionais àqueles disponíveis, principalmente com respeito às curvas de levantamento das válvulas (comes). As figuras 4-6. e 4-7. mostram os resultados obtidos pelo programa, para diversos valores de cruzamento de válvulas, de um motor monocilíndrico operando sem combustão.

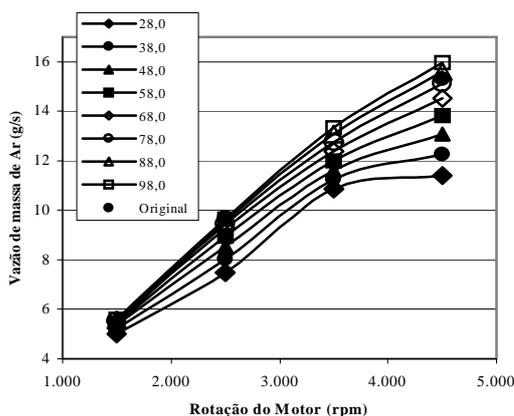


Figura 4-6 - Comparação da vazão em massa de ar com a do motor original

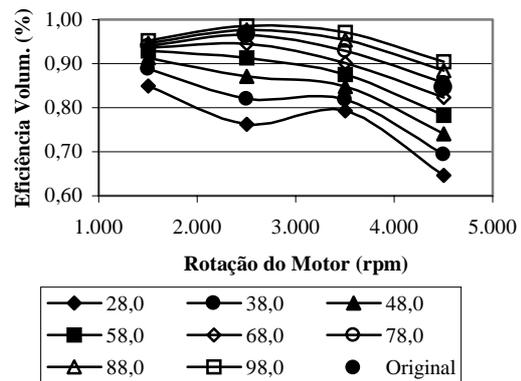


Figura 4-7 - Comparação da eficiência volumétrica com a do motor original

São superpostos nas figuras, para comparação os valores dados por Chen et al. (1992). Verifica-se que para o valor do cruzamento fornecido (28 graus), os resultados são diferentes

dos obtidos. Porém, para um valor de cruzamento de 78 graus, os valores obtidos são bem próximos do apresentado por Chen (1992). Chega-se à conclusão de que as curvas de levantamento das válvulas adotadas neste trabalho são diferentes daquelas apresentadas pelo motor da literatura, não sendo possível, portanto, comparações quantitativas. Entretanto, comparações qualitativas podem ser feitas.

Para demonstrar as possibilidades de estudos das influências do comprimento, do diâmetro do duto de admissão e do duto de escape na eficiência volumétrica e na potência indicada do motor, são apresentados as Figuras 4-8 a 4-13. com os resultados do motor operando normalmente, utilizando o modelo de Langeani (1995).

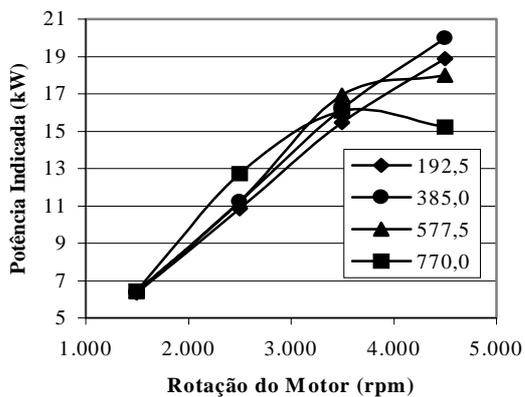


Figura 4-8 - Influência do comprimento de admissão na potência indicada

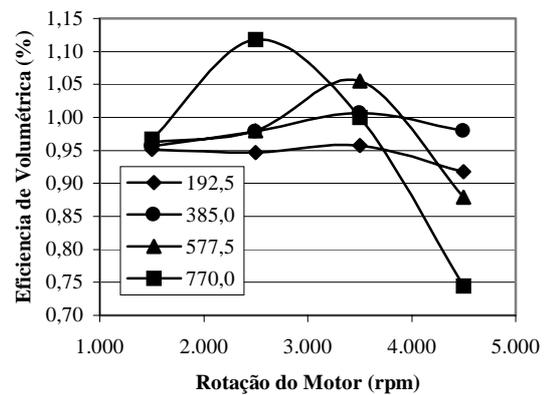


Figura 4-9 - Influência do comprimento do duto de admissão na eficiência volumétrica

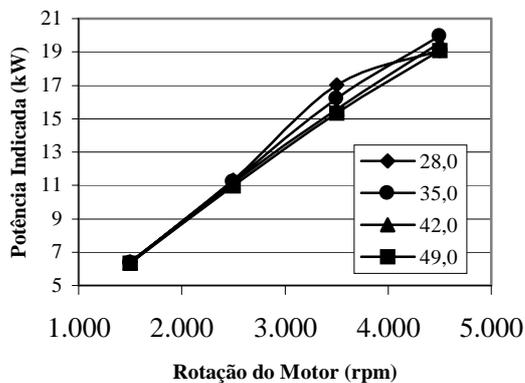


Figura 4-10 - Influência do diâmetro de admissão na potência indicada

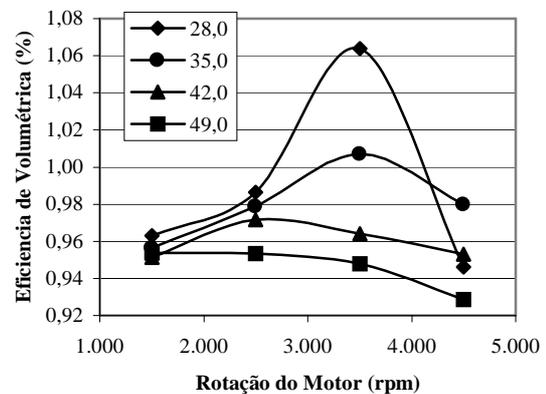


Figura 4-11 - Influência do diâmetro do duto de admissão na eficiência volumétrica

Analisando-se a variação do comprimento do duto de admissão, verifica-se pela variação da eficiência volumétrica que é possível sintonizar o motor para obtenção de melhor desempenho em uma determinada rotação, embora, em rotações muito diferentes da de sintonização, o desempenho fique abaixo daquele do motor se sintonização. Assim, para uma aplicação determinada do motor, pode-se ganhar muito em termos de desempenho, como, por exemplo, no caso de motores de corrida, que operam numa faixa estreita de rotação.

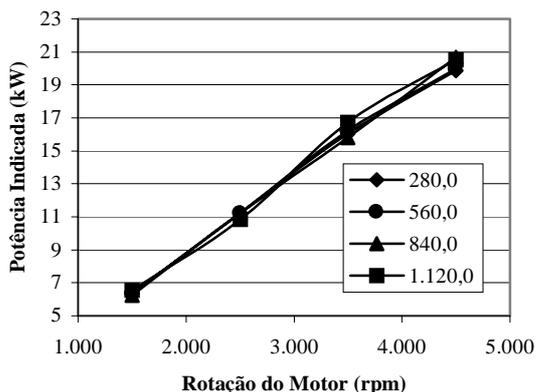


Figura 4-12 - Influência do comprimento do duto de escape na potência indicada

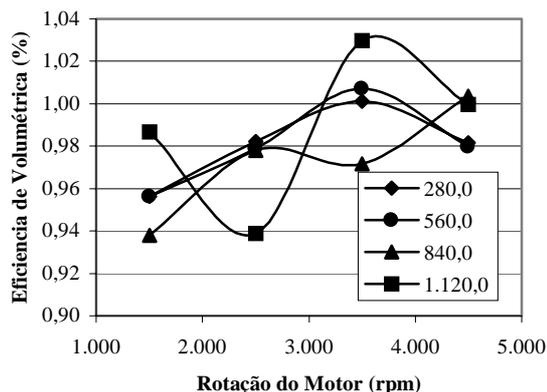


Figura 4-13 - Influência do comprimento do duto de escape na eficiência volumétrica

Resultados semelhantes foram obtidos com a variação do diâmetro do duto de admissão, e do comprimento do duto de escape, embora a sintonização apareça em rotações diferentes.

4. CONCLUSÕES

O modelo desenvolvido mostrou-se adequado à simulação de motores de combustão interna, apresentando estabilidade na obtenção dos resultados numa ampla faixa de operação.

Embora não estivessem disponíveis dados complementares dos motores analisados, os resultados obtidos são qualitativamente muito bons e quantitativamente aceitáveis, pois estão dentro da faixa de valores esperados. As discrepâncias encontradas foram justificadas.

Futuros trabalhos nesta linha de estudos devem incluir, de forma obrigatória, o levantamento de dados experimentais para a certificação dos resultados obtidos pelo programa, para o motor e para seus componentes, uma vez que se poderão obter todas as informações geométricas do motor.

5. REFERÊNCIAS

- AVL LIST GmbH, 1996, FIRE version 6.2b – Reference Manual, AVL.
- Benson, R. S., 1982, The Thermodynamics and Gas Dynamics of Internal Combustion Engines, Clarendon Press, Vol. I, Oxford.
- Bingham, J. F. & Blair, G. P., 1985, An Improved Branched Pipe Model for Multi-Cylinder Automotive Engine Calculations, Proc. I. Mech. Eng., Vol. 199, pp. 65-77.
- Chapman, M., 1981, FRAM - Nonlinear Damping Algorithms for the Continuity Equation, Journal of Comp. Physics, Vol. 44, nº 1, pp 84-103.
- Chen, C., Veshagh, A., & Wallace, F. J., 1992, A Comparison Between Alternative Methods for Gas Flow and Performance Prediction of Internal Combustion Engines, SAE Technical Paper 921734.
- Cohen, H., Rogers, G. F. C. & Saravanamuttoo, H. I. H., 1996, Gas Turbine Theory, Longman Scientific & Technical, Fourth edition, Cingapura.
- Courant, R., Friedrichs, K., & Lewy, H., 1967, On Partial Difference Equations for Mathematical Physics, I.B.M. Journal II, pg. 215-234.
- Heywood, J. B., 1988, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill Book Company, First edition, USA.

- Langeani, M., 1995, Motor Dois Tempos com Válvulas no Cabeçote: Um Estudo Termodinâmico, Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica.
- Lax, P., & Wendroff, B., 1960, Systems of Conservation Laws, Comm. Pure App. Math. Vol. 13, pp. 217-237.
- MacCormack, R. W., 1982, A Numerical Method for Solving the Equation of Compressible Viscous Flow, AIAA Journal, Vol. 20, nº 9, September.
- Monteiro, J. F. C., 1999, Modelos Matemáticos e Computacionais para a Simulação do Escoamento em Motores de Combustão Interna, Tese de Mestrado, ITA.
- Poloni, M., Winterbone, D. E., & Nichols, J. R., 1987, Comparison of Unsteady Flow Calculations in a Pipe by the Method of Characteristics and the Two Step Lax-Wendroff Method, International Journal Mechanical Science, Vol. 29, nº 5.
- Takizawa, M., Uno, T., Oue, T. & Yura, T., 1982, A Study of Exchange Process Simulation of an Automotive Multi-Cylinder Internal Combustion Engine, SAE Technical Paper 820410.
- Sonntag, R. E., Borgnakke, C. & Van Wylen, G. J. &, 1998, Fundamentos da Termodinâmica, Edgard Blücher Ltda., 5ª edição, São Paulo.

INTERNAL COMBUSTION ENGINES PERFORMANCE SIMULATION

Keywords: *Simulation, performance, piston engine, internal combustion engine*

Abstract: *A study of numerical methods for the simulation of internal combustion engines is presented. Functional blocks, representing each component of the engine, can be combined to simulate the engine. A model was selected for each component. The engine simulation is carried out connecting the functional blocks. The inviscid conservation equations coupled with loss models were solved using a C++ computer program. Engine performance simulation is shown and results compared with published data.*